



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA – UNILAB**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**SHEYLA BARROS DE ALENCAR OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE  
POTÊNCIA: ESTUDO DE CASOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS**

**REDENÇÃO/CE**

**2025**

**SHEYLA BARROS DE ALENCAR OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE  
POTÊNCIA: ESTUDO DE CASOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS**

Monografia apresentada como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

**Orientador(a):** Prof.(a). Dr.  
Vandilberto Pereira Pinto

**REDENÇÃO/CE**

**2025**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Oliveira, Sheyla Barros de Alencar.

O42a

Análise de ensaios elétricos em transformadores de potência:  
estudo de casos para diagnóstico de falhas / Sheyla Barros de  
Alencar Oliveira. - Redenção, 2025.  
65f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de  
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da  
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,  
2025.

Orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

1. Energia elétrica - Transformadores de potência. 2. Ensaio  
elétrico. 3. Manutenção preventiva. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.314

---

**SHEYLA BARROS DE ALENCAR OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE  
POTÊNCIA: ESTUDO DE CASOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS**

Monografia apresentada como  
requisito para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia de Energias, na Universidade da  
Integração Internacional da Lusofonia Afro-  
Brasileira.

**Aprovada em: 02 / 06 / 2025**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.(a). Dr. Vandilberto Pereira Pinto (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

---

Prof.(a). Dra. Lígia Maria Carvalho Sousa

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

---

Prof.(a). Dr. Herivelton Alves De Oliveira

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Dedico este trabalho à minha companheira, pelo amor e incentivo que me deram forças para seguir em frente. Aos meus pais, por sempre me motivarem a buscar o conhecimento e por todo o apoio incansável. E aos meus irmãos, pela leveza e companhia que tornaram esta jornada mais agradável.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me guiar em minha jornada, permitindo que eu alcançasse minhas conquistas e chegasse até este momento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vandilberto, minha profunda gratidão. Sua paciência e dedicação foram muito importantes, acompanhando-me em grande parte da minha vida acadêmica. Sua capacidade de trazer muitas ideias novas, explorando outros caminhos na Engenharia de Energias e saindo do comum da área, foi uma inspiração constante que ampliou meus horizontes.

À minha companheira, por ser meu porto seguro e por seu apoio fundamental em cada etapa. Seu amor e incentivo foram a força que me impulsionou, especialmente quando as dificuldades surgiram e a vontade de parar parecia maior. Sua presença constante e sua influência positiva foram decisivas para que eu continuasse focado nos estudos e sempre buscando meu crescimento profissional.

Um agradecimento especial aos meus pais, por serem a base de tudo. O apoio incondicional que sempre me deram, tanto nos momentos de estudo quanto nos desafios da vida, e os valores que me ensinaram, foram essenciais para me transformar na pessoa que sou hoje. Suas lições sobre dedicação e a importância do conhecimento são ensinamentos que levarei para toda a minha vida pessoal e profissional.

Por fim, aos meus irmãos, por participarem ativamente da minha jornada. Além das palavras de apoio que sempre vieram na hora certa, o bom humor e as brincadeiras diárias tornaram o clima mais leve, transformando cada etapa em uma caminhada mais agradável e cheia de boas lembranças.

## RESUMO

Transformadores são equipamentos de potência cruciais para a transmissão e distribuição de energia elétrica. A importância desses equipamentos é inegável, visto que a falha de um transformador pode levar à interrupção do fornecimento de energia, causando prejuízos financeiros e impactos significativos para os consumidores. Para o devido contexto da análise de dados de ensaios, este trabalho também aborda a teoria fundamental dos transformadores. Os ensaios elétricos desempenham um papel fundamental na garantia da confiabilidade do sistema, permitindo a identificação de possíveis falhas em transformadores e a prevenção de ocorrências através da análise dos resultados. Este trabalho apresenta e analisa alguns dos ensaios elétricos mais utilizados para esse fim, incluindo: resistência de isolamento, resistência dos enrolamentos e relação de transformação. Esses ensaios são classificados como de rotina e desempenham um papel importante nas manutenções preventivas, contribuindo diretamente para a vida útil dos transformadores; é importante ressaltar, no entanto, que eles representam apenas uma parte dos ensaios existentes. Através da interpretação dos resultados, é possível identificar indícios de falhas e tomar medidas preventivas para garantir a confiabilidade do sistema elétrico. No caso dos transformadores utilizados para análise, a reprova nos resultados dos ensaios possibilitou aprofundar a investigação e criar uma hipótese para a fonte do problema. Por exemplo, os ensaios de relação de transformação e resistência dos enrolamentos permitiram levantar a hipótese de um possível curto-circuito na bobina, alterando a relação entre as bobinas e a resistência das mesmas. Adicionalmente, o ensaio de resistência de isolamento, cujo objetivo principal é avaliar o grau de degradação do equipamento, também apresentou variação nos resultados, o que reforça a necessidade de acompanhamento e intervenção.

**Palavras-chave:** Transformadores de potência, ensaios elétricos, confiabilidade, manutenção preventiva, análise de dados.

## ABSTRACT

Transformers are power equipment crucial for the transmission and distribution of electrical energy. The importance of these devices is undeniable, as a transformer failure can lead to an interruption in power supply, causing financial losses and significant impacts for consumers. For the proper context of test data analysis, this work also addresses the fundamental theory of transformers. Electrical tests play a fundamental role in ensuring system reliability, allowing for the identification of potential failures in transformers and the prevention of occurrences through result analysis. This work presents and analyzes some of the most commonly used electrical tests for this purpose, including: insulation resistance, winding resistance, and turns ratio. These tests are classified as routine and play an important role in preventive maintenance, directly contributing to the transformers' lifespan; it's important to note, however, that they represent only a part of the existing tests. Through the interpretation of results, it's possible to identify signs of failure and take preventive measures to ensure the reliability of the electrical system. In the case of the transformers used for analysis, the failed test results allowed for a deeper investigation and the creation of a hypothesis for the source of the problem. For example, the turns ratio and winding resistance tests made it possible to hypothesize a potential short circuit in the coil, altering the ratio between the coils and their resistance. Additionally, the insulation resistance test, whose main objective is to evaluate the degree of equipment degradation, also showed variations in results, reinforcing the need for monitoring and intervention.

**Keywords:** Power transformers, electrical tests, reliability, preventive maintenance, data analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transmissão e distribuição de energia elétrica .....	17
Figura 2: Transformador de 230kV/34,5kV.....	17
Figura 3: Primário e secundário do transformador.....	18
Figura 4: Representação de um transformador ideal.....	20
Figura 5: Simplificação do circuito de um transformador.....	22
Figura 6: Diagrama vetorial da corrente a vazio. ....	24
Figura 7: Circuito equivalente do primário .....	25
Figura 8: Circuito equivalente considerando primário e secundário.....	25
Figura 9: Circuito equivalente do primário com a reflexão do secundário .....	26
Figura 10: Modelagem de um circuito equivalente do transformador .....	26
Figura 11: Circuito da operação a vazio em transformador .....	27
Figura 12: Associações do ramo magnetizante .....	27
Figura 13: Lei de Lenz .....	28
Figura 14: Corrente de Foucault.....	29
Figura 15: Curva de Histerese .....	30
Figura 16: Circuito equivalente do ensaio do transformador em curto-circuito.....	30
Figura 17: Equivalente da queda de tensão .....	32
Figura 18: Ensaio de resistência dos enrolamentos nos enrolamentos.....	33
Figura 19: Ensaio de relação de transformação.....	35
Figura 20: Ensaio de resistência de isolamento.....	36
Figura 21: Ensaio de resistência dos enrolamentos (TR225) .....	40
Figura 22: Gráficos comparativos dos ensaios de resistência dos enrolamentos. ....	42
Figura 23: Ensaio de relação de transformação (TR225).....	43
Figura 24: Dados da placa do transformador de 225kVA.....	43
Figura 25: Gráfico de Erro Médio no Ensaio de Relação de Transformação.....	45
Figura 26: Ensaio de resistência de isolamento (TR7500).....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de transformação.....	35
Tabela 2: Valores para Rab com base na idade .....	37
Tabela 3:Valores para R com base na idade.....	38
Tabela 4: Valores base para o índice de absorção .....	39
Tabela 5: Valores base para o índice de polarização.....	39
Tabela 6: Resultado da Análise para o Transformador de 225kVA.....	41
Tabela 7: Dados Coletados das Manutenções Periódicas.....	44
Tabela 8: Validação do estado das bobinas .....	45
Tabela 9: Dados coletados em campo .....	47
Tabela 10: Valores referenciados para 20°C e classificados de acordo com a idade.....	47
Tabela 11: Avaliação do índice de polarização .....	48
Tabela 12: Avaliação do índice de absorção .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Phi_m$	Fluxo magnético
$\Phi_p$	Fluxo magnético do primário
$\Phi_s$	Fluxo magnético do secundário
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
$e_p$	Tensão induzida no primário
$e_s$	Tensão induzida no secundário
$i_p$	Corrente do primário
$N_p$	Número de espiras no primário
$N_s$	Número de espiras no secundário
$\omega$	Velocidade angular
$E_p$	Tensão eficaz no primário
$E_s$	Tensão eficaz no secundário
$f$	Frequência
$a$	Relação de transformação
$V_1$	Tensão no primário
$V_2$	Tensão no secundário
$V_n$	Tensão nominal
$I_1$	Corrente no primário
$I_2$	Corrente no secundário
$I_o$	Corrente a vazio
$Z_c$	Impedância de carga
$Z_m$	Impedância de magnetização
$F_{po}$	Fator de Potência
$R_{ms}$	Resistência do ramo magnetizante em série
$X_{ms}$	Reatância do ramo magnetizante em série
$R_{mp}$	Resistência do ramo magnetizante em paralelo
$X_{mp}$	Reatância do ramo magnetizante em paralelo
$P_j$	Perdas nos enrolamentos
$R_r$	Resistência corrigida
$\theta_r$	Temperatura de referência
$\theta_1$	Temperatura registrada
$E\%$	Erro percentual
$R_m$	Relação de transformação registrada
$R_p$	Relação de transformação teórica
$R_T$	Resistência registrada
$K_T$	Fator de correção da temperatura
$R_{60\text{ seg}}$	Resistência de isolamento registrada no ensaio em 60 segundos
$R_{30\text{ seg}}$	Resistência de isolamento registrada no ensaio em 30 segundos
$R_{10\text{ min}}$	Resistência de isolamento registrada no ensaio em 10 minutos
$R_{1\text{ min}}$	Resistência de isolamento registrada no ensaio em 1 minuto
$I_p$	Índice de polarização
$I_a$	Índice de absorção

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>3</b>	<b>TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA</b> .....	16
3.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	19
3.2	REFLEXÃO DE IMPEDÂNCIAS, TENSÃO E CORRENTE .....	22
3.3	CORRENTE “ <i>INRUSH</i> ” .....	23
3.4	OPERAÇÃO A VAZIO .....	23
3.5	CIRCUITO EQUIVALENTE .....	25
3.6	CONSIDERAÇÕES E PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	26
3.7	PERDAS NO FERRO .....	28
3.7.1	PERDAS POR CORRENTE PARASITA .....	28
3.7.2	PERDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA.....	29
3.7.3	PERDAS NO COBRE.....	30
3.8	QUEDA DE TENSÃO.....	31
3.9	MÉTODO DA SOMA DUPLAMENTE PONDERADA NORMALIZADA (SDPN) 33	
<b>4</b>	<b>ENSAIOS ELÉTRICOS BÁSICOS EM TRANSFORMADORES</b> .....	33
4.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS.....	33
4.2	ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO .....	34
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO .....	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÕES</b> .....	39
5.1	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS.....	40
5.2	ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO.....	42
5.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	49
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

A transmissão e distribuição de energia elétrica por longas distâncias, das usinas até o consumidor final, exige um sistema robusto que minimize custos e garanta a confiabilidade. A grande extensão da rede não apenas demanda mais materiais para infraestrutura, mas também eleva significativamente as perdas de energia, impactando diretamente os custos operacionais.

Nesse contexto, os transformadores desempenham um papel central. Eles possibilitam a elevação da tensão para o transporte eficiente de energia, minimizando perdas no percurso. No entanto, os próprios transformadores possuem perdas intrínsecas, como as perdas no cobre, por histerese magnética, por corrente parasita e por fluxo disperso, que podem comprometer sua operação. A funcionalidade desses equipamentos baseia-se na relação de espiras entre seus lados primário e secundário, que influencia diretamente a tensão de saída.

Para assegurar a estabilidade e a longevidade dos transformadores, a realização de manutenções periódicas é crucial. Divididas em rotina, de tipo e especiais, essas manutenções visam a prevenção de falhas. Este trabalho se concentrará nos ensaios elétricos de rotina essenciais para o bom funcionamento do sistema: resistência dos enrolamentos, resistência de isolamento e relação de transformação.

A importância desses ensaios elétricos reside em sua capacidade de garantir a confiabilidade do sistema elétrico, prevenindo interrupções no fornecimento de energia. Ao analisar a condição do transformador, os ensaios permitem estimar sua vida útil e indicar a necessidade de ações preventivas ou corretivas, ou, em último caso, a substituição. A implementação de medidas preventivas, inclusive as baseadas em outros parâmetros como o índice de polarização e absorção, representa uma solução mais econômica do que a troca completa do equipamento.

Este trabalho se aterá aos embasamentos teóricos e normativos para avaliar e diagnosticar transformadores de potência, detalhando os principais conceitos e normas aplicadas aos ensaios elétricos, e assim, contribuindo para a segurança operacional do sistema.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar ensaios elétricos em transformadores de potência com o objetivo de identificar possíveis falhas, visando prolongar sua vida útil e aumentar a confiabilidade do sistema elétrico.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Apresentar os conceitos fundamentais relacionados ao funcionamento de transformadores de potência;
- b) Descrever os ensaios elétricos de resistência de isolamento, resistência dos enrolamentos e relação de transformação;
- c) Analisar os resultados obtidos e compará-los com os valores nominais do equipamento;
- d) Indicar técnicas aplicáveis ao diagnóstico de falhas em transformadores;
- e) Discutir os impactos das falhas em transformadores na continuidade do fornecimento de energia elétrica.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Os transformadores são componentes fundamentais no setor elétrico, estando presentes em diversas etapas do sistema, desde a geração de energia até a distribuição e o consumo final em ambientes industriais, comerciais e residenciais.

Diante da crescente demanda por energia elétrica, torna-se essencial que os profissionais da área compreendam o funcionamento, a importância e os cuidados necessários com esses equipamentos.

Os ensaios elétricos em transformadores desempenham um papel crucial na prevenção de falhas, garantindo a segurança contra curtos-circuitos e choques elétricos, além de evitar interrupções no fornecimento de energia.

Por meio desses ensaios, é possível avaliar a condição do isolamento elétrico e identificar a necessidade de intervenções preventivas ou corretivas, contribuindo diretamente para a confiabilidade e a continuidade do sistema elétrico.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, organizados de forma a fornecer embasamento teórico e prático ao tema proposto:

- ❖ O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com as principais bases que auxiliam no embasamento do trabalho.

- ❖ O Capítulo 3 Aborda os conceitos fundamentais sobre transformadores de potência, com destaque para seu funcionamento e os fatores que influenciam sua operação;
- ❖ Capítulo 4 detalha a teoria dos ensaios elétricos, explicando seu funcionamento e aplicação prática
- ❖ O Capítulo 5 propõe a exposição dos resultados e a análise crítica dos valores apresentados em campo, validando o funcionamento do equipamento e expondo a necessidade de uma intervenção.
- ❖ Por fim, o capítulo 6 apresenta a conclusão dos resultados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os transformadores têm como principal função elevar ou rebaixar os níveis de tensão em sistemas elétricos. Essa característica é essencial para o transporte eficiente de energia elétrica por longas distâncias, conforme destacado por Júnior (2016). Ao elevar a tensão na etapa de transmissão, a corrente elétrica é reduzida, o que minimiza as perdas por efeito Joule ( $P = R \times I^2$ ), em que  $P$  representa a potência dissipada,  $R$  a resistência do condutor e  $I$  a corrente elétrica. Com isso, torna-se possível transmitir grandes quantidades de potência com perdas significativamente reduzidas ao longo das linhas de transmissão.

Contudo, a energia em alta tensão não pode ser utilizada diretamente pelos consumidores ou em ambientes urbanos e industriais devido a questões de segurança e compatibilidade com os equipamentos. É nesse ponto que os transformadores atuam novamente, rebaixando a tensão para níveis seguros e adequados para a distribuição local e o uso final. Essa alternância entre elevação e rebaixamento da tensão, viabilizada pelos transformadores, garante que a energia gerada em usinas distantes chegue aos lares e indústrias de forma econômica e segura (BISPO, 2019).

Segundo Bispo (2019), os ensaios nos transformadores de potência visam expor diversos caminhos para a análise do equipamento, estabelecendo parâmetros e analisando as principais perdas nos transformadores. O diagnóstico nas espiras é realizado através da relação de transformação e resistência dos enrolamentos.

Os transformadores de potência devem transferir energia do primário para o secundário através do fluxo magnético. Durante a transição do fluxo, o transformador possui perdas, então nem toda potência do enrolamento primário é entregue ao secundário. As perdas estão presentes em diferentes formas, como perdas no cobre, histerese magnética, correntes parasitas e fluxo disperso (SANTOS, 2012).

Santos (2012) destacou que a análise nos transformadores é essencial para um diagnóstico prévio de uma possível falha, que podem ocasionar problemas caso a descoberta tardia ocorra. A compreensão dos ensaios é necessária para que pequenos problemas após a detecção não ocasionem danos futuros, conseguindo estabelecer quais equipamentos estão adequados para operação.

Conforme Carrusca (2021), a análise durante a manutenção preventiva aumenta a confiabilidade do processo, conseguindo prever a ocorrência de anomalias e reduzindo os custos.

Fonseca (2014) apresentou os principais equipamentos abordados durante o trabalho para diagnóstico dos transformadores: TTR (*Transformer Turn Ratio*), megôhmetro e o microhmímetro, utilizados respectivamente para os ensaios de relação de transformação, resistência de isolamento e resistência dos enrolamentos.

Marques (2018) realizou a avaliação estatística dos ensaios elétricos e obteve uma faixa de valores para a classificação do transformador, chamando de método SDPN, entretanto o objetivo deste trabalho é a avaliação básica, com uma gama menor de ensaios.

Propõe-se, neste trabalho, a análise de transformadores de potência através da confrontação de dados de ensaios com parâmetros estabelecidos em referências bibliográficas, artigos e normas. O intuito é formular hipóteses para o diagnóstico dos transformadores, com base na interpretação dos resultados

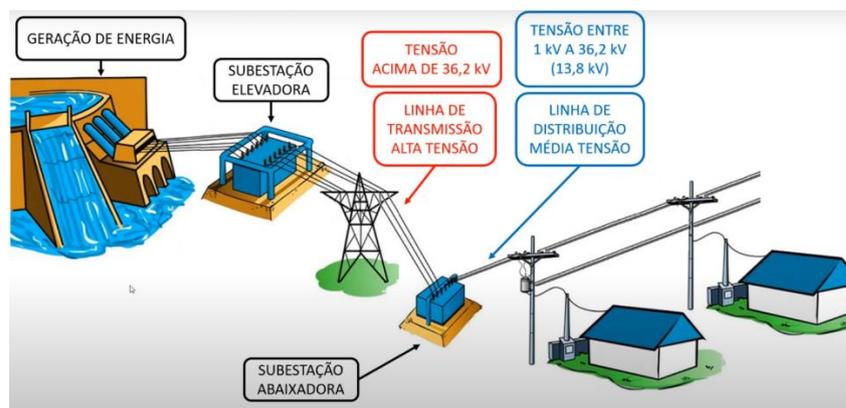
### **3 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Os transformadores de potência são componentes essenciais na transmissão e distribuição de energia elétrica. Sua função principal é alterar os níveis de tensão para permitir o transporte eficiente da energia elétrica. No entanto, esses equipamentos estão sujeitos a falhas que podem levar a interrupções no fornecimento de energia, além de gerar gastos significativos para as empresas do ramo e consequentemente prejudicando a sociedade em geral (AZEVEDO, 2023).

Os transformadores foram construídos devido a necessidade de transportar energia por longas distâncias a um custo acessível. As usinas normalmente são instaladas em ambientes distantes dos pontos de consumo por possuir requisições específicas para atender em grande porte. A necessidade de transmitir energia por longas distância, com as especificações técnicas e custo acessível, proporcionou a construção de linhas de alta tensão para a transmissão de energia por longas distâncias (MARTIGNONI, 1969).

Após a geração, a energia é direcionada para uma subestação elevadora de tensão e, em seguida, transmitida por longas distâncias através das linhas de transmissão de alta tensão. Chegando à subestação abaixadora de tensão, a energia é preparada para a distribuição. A Figura 1 ilustra visualmente esse fluxo da energia elétrica, ressaltando a função crucial das subestações, onde os transformadores realizam a elevação e redução da tensão para viabilizar a transmissão eficiente e a distribuição segura até os consumidores finais

Figura 1: Transmissão e distribuição de energia elétrica



Fonte: Geração,... (2020)

A Figura 2 exibe um transformador de 80 MVA, situado em uma subestação elevadora. Seu propósito é elevar a tensão de 34,5 kV para 230 kV, preparando a energia para ser transmitida eficientemente às demais subestações ou à rede de transmissão. Fundamentalmente, os transformadores são constituídos por dois ou mais enrolamentos que, ao compartilharem um fluxo magnético, são capazes de alterar os níveis de tensão.

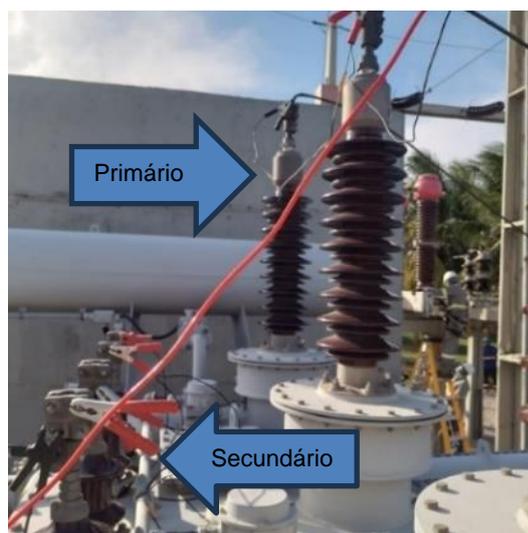
Figura 2: Transformador de 230kV/34,5kV.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A Figura 3 apresenta uma parte estrutural do transformador, que é composto por enrolamentos de alta tensão (AT) em um lado e de baixa tensão (BT) no outro. É importante ressaltar que, embora neste transformador específico o lado primário corresponda à alta tensão e o secundário à baixa, a definição de primário e secundário não está diretamente associada ao nível de tensão.

Figura 3: Primário e secundário do transformador.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O lado primário é aquele cujas bobinas estão conectadas à fonte geradora, enquanto o secundário é o lado onde a carga é alimentada. Essa designação de primário à alimentação é uma convenção, pois os transformadores são capazes de operar de forma bidirecional, permitindo o fluxo de energia em ambos os sentidos. Além dessa distinção, as bobinas são também comumente referidas como de “alta tensão” (AT) e “baixa tensão” (BT), indicando seus respectivos níveis nominais (UMANS, 2014).

Os ensaios em transformadores, segundo a NBR5356-1, podem ser distinguidos em três tipos: ensaios de rotina, ensaios de tipo e ensaio especial. O ensaio de rotina é realizado em todos os transformadores da localização em questão, enquanto o ensaio de tipo é realizado em um transformador base, com as mesmas características dos demais, que serve como um referencial para todos no recinto. O ensaio especial é distinto dos demais, são ensaios específicos, solicitado em um acordo entre fabricante e comprador.

Os ensaios de rotina são aplicados em manutenções preventivas, com o objetivo de averiguar as condições de funcionamento do transformador, garantindo a qualidade e estabilidade do dispositivo (ABNT, 2007).

Segundo a ABNT (2007), os ensaios de rotina são:

- Ensaio de resistência dos enrolamentos;
- Verificação da relação de transformação, polaridade, deslocamento angular e sequência de fases;
- Impedância de curto-circuito e perdas em carga;
- Perdas em vazio e corrente de excitação;
- Ensaio dielétricos de rotina;
- Ensaio de comutador de derivações em carga (quando possível);
- Resistência de isolamento;
- Estanqueidade e resistência à pressão;
- Inspeção do funcionamento dos acessórios;
- Ensaio no óleo isolante (rigidez dielétrica, teor de água, fator de dissipação e tensão interfacial);
- Inspeção na pintura externa.

Durante o trabalho, será discorrido de forma mais profunda sobre os ensaios de resistência dos enrolamentos, relação de transformação e resistência de isolamento, por serem os ensaios mais recomendados para os testes em transformadores durante as manutenções preventivas (CARRIÃO, 2024).

### 3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

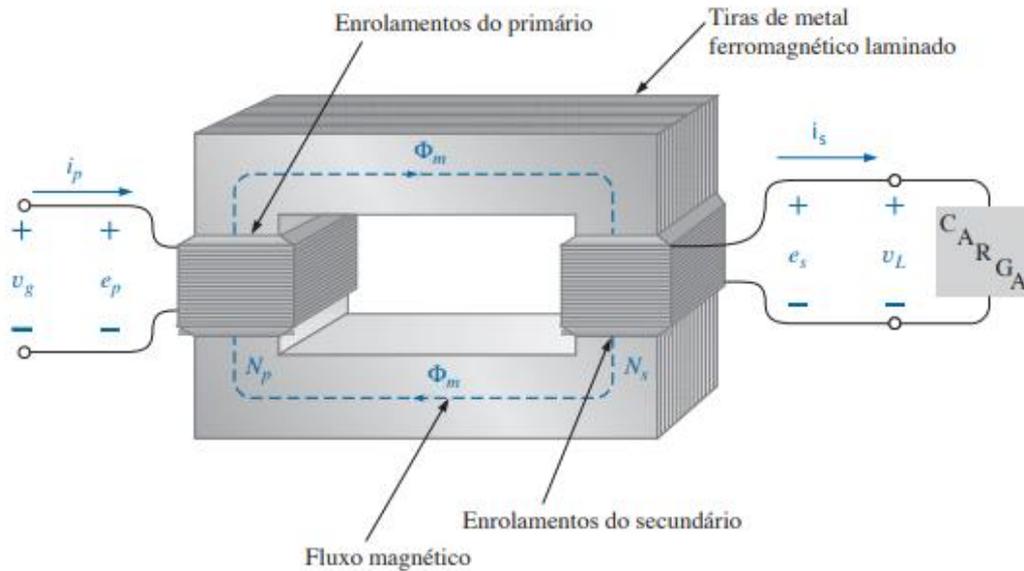
O transformador possui enrolamentos (bobinas) nos lados de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT), cada um com um número específico de espiras, o que define a relação de transformação do equipamento. O princípio de funcionamento baseia-se na aplicação de uma corrente alternada em uma das bobinas (o enrolamento primário), que gera um fluxo magnético no núcleo do transformador. Esse fluxo, por sua vez, atravessa e interliga o outro enrolamento (o secundário), induzindo nele uma tensão (UMANS, 2014).

Em um transformador ideal, assume-se que todo o fluxo magnético gerado no enrolamento primário ( $\Phi_p$ ) é o mesmo fluxo mútuo ( $\Phi_m$ ) que se propaga e interliga completamente o enrolamento secundário ( $\Phi_s$ ). Dessa forma, estabelece-se a seguinte igualdade para o fluxo em um transformador ideal:  $\Phi_m = \Phi_p = \Phi_s$ .

Considerando que o fluxo magnético consiga realizar a travessia por completo na segunda bobina, ou seja, com resistências desprezíveis, sem fluxo disperso, ausência de correntes parasitas, perdas por histerese, ou qualquer vetor que impeça a segunda bobina de receber o fluxo completo, podemos determinar como transformador ideal (BOYLESTAD, 2012).

Conforme apresentado na figura 4, o fluxo magnético considerado no enrolamento primário é o mesmo no enrolamento do secundário.

Figura 4: Representação de um transformador ideal



Fonte: Boylestad, 2012.

Quando uma corrente alternada senoidal é aplicada no enrolamento primário de um transformador, ela gera um fluxo magnético também senoidal no núcleo. O valor instantâneo desse fluxo ( $\phi$ ) pode ser expresso como (BOYLESTAD, 2012):

$$\phi = \Phi_m \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

- $\phi$ : Fluxo magnético instantâneo (Wb);
- $\Phi_m$ : Fluxo magnético máximo (ou de pico) (Wb);
- $\omega$ : velocidade angular (rad/s);
- $t$ : tempo (s).

Conforme a Lei de Indução de Faraday, a tensão instantânea ( $e_p$ ) induzida no enrolamento primário é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que o atravessa, multiplicada pelo número de espiras:

$$e_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt} \quad (2)$$

- $e_p$ : tensão induzida no primário (V);
- $N_p$ : número de espiras do enrolamento primário.

Substituindo a Equação (1) na Equação (2) e considerando a magnitude da tensão induzida (desprezando o sinal negativo de Lenz para fins de amplitude), obtemos a expressão para a tensão instantânea no primário:

$$\begin{aligned} e_p &= N_p \frac{d}{dt} (\Phi_m \text{sen}(\omega t)) \\ e_p &= \omega N_p \Phi_m \text{cos}(\omega t) \\ e_p &= \omega N_p \Phi_m \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

A tensão de pico (máxima) induzida no primário é, portanto,  $E_p = \omega N_p \Phi_{max}$ . Para obter a tensão eficaz (RMS) no primário ( $E_p$ ), dividimos a tensão de pico por  $\sqrt{2}$  (BOYLESTAD, 2012):

$$E_p = \frac{\omega N_p \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Considerando que  $\omega = 2\pi f$  (onde  $f$  é a frequência em Hz), a Equação (4) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{2\pi f N_p \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \\ E_p &\approx 4,44 f N_p \Phi_{max} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Em um transformador ideal, o fluxo magnético máximo que interliga o primário é o mesmo que interliga o secundário ( $\Phi_{max}$ ). Assim, a tensão eficaz no secundário ( $E_s$ ) pode ser derivada de conforme à Equação (4.1):

$$E_s = 4,44 f N_s \Phi_{max} \quad (4.2)$$

Dividindo a Equação (4.1) pela Equação (4.2), os termos comuns ( $4,44 f N_s \Phi_{max}$ ) se cancelam, resultando na relação de transformação de tensões:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{4,44 f N_p \Phi_m}{4,44 f N_s \Phi_m} \quad (5)$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (6)$$

A relação expressa na Equação (6) é uma das principais relações teóricas de um transformador, pois demonstra que a proporção entre as tensões eficazes no primário e no secundário é diretamente proporcional à proporção do número de espiras de seus respectivos enrolamentos (BOYLESTAD, 2012). Essa relação é comumente denominada relação de transformação e é representada pela letra “K”:

$$K = \frac{N_p}{N_s} \quad (7)$$

Onde:

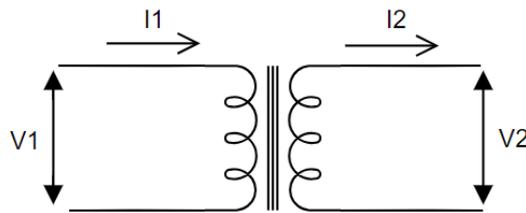
- $E_p$ : tensão eficaz (RMS) no primário (V);
- $E_s$ : tensão eficaz (RMS) no secundário (V);
- $N_p$ : Número de espiras no primário;
- $N_s$ : Número de espiras no secundário.

A obtenção da relação de transformação nos transformadores pode ser realizada de dois modos: ensaio a vazio ou por meio do equipamento denominado de “*Transformer Turns Ratio*”, conhecido também pela forma abreviada “TTR”.

### 3.2 REFLEXÃO DE IMPEDÂNCIAS, TENSÃO E CORRENTE

A linha de transmissão é composta por diversos dispositivos de transformação interligados e tem a necessidade de elevar ou abaixar as faixas de tensão para reduzir as perdas. Um modelo adotado para efetuar os cálculos é a reflexão dos dados de um enrolamento para o outro (MONTICELLI, 2011). A figura 5 é a simplificação do esquemático para facilitar a visualização da reflexão das correntes e tensões.

Figura 5: Simplificação do circuito de um transformador



**Fonte:** Elaboração própria.

Conforme as considerações adotadas por Monticelli (2011), a tensão do secundário ( $V_2'$ ) refletida no primário é igual a tensão do primário e a corrente refletida do secundário ( $I_2'$ ) é similar a corrente do primário, assim temos as seguintes equações:

$$V_1 = V_2' = KV_2 \quad (8)$$

$$I_1 = I_2' = \frac{1}{K} I_2 \quad (9)$$

Assim, a representação da impedância da carga ( $Z_c$ ) pode ser representada da seguinte forma:

$$Z_c = \frac{V_2}{I_2} \quad (10)$$

Reflexão da impedância no circuito e utilizando as equações 8 e 9:

$$Z_c' = \frac{V_1}{I_1} = \frac{KV_2}{\frac{1}{K}I_2} = K^2 \frac{V_2}{I_2} \quad (11)$$

### 3.3 CORRENTE “INRUSH”

A energização de um transformador ocorre com a aplicação de tensão ao seu enrolamento primário, o que inicia a magnetização do núcleo, que pode estar em um estado de inércia magnética ou com fluxo residual. Durante esse processo de energização, especialmente quando o transformador está operando a vazio, a indução magnética no núcleo pode atingir valores significativamente elevados, superando em até três vezes a indução magnética nominal (ou de saturação). Esse fenômeno transitório de magnetização resulta na corrente de “*inrush*”, que pode alcançar entre 8 e 10 vezes o valor da corrente nominal do transformador (RAFFO, 2010).

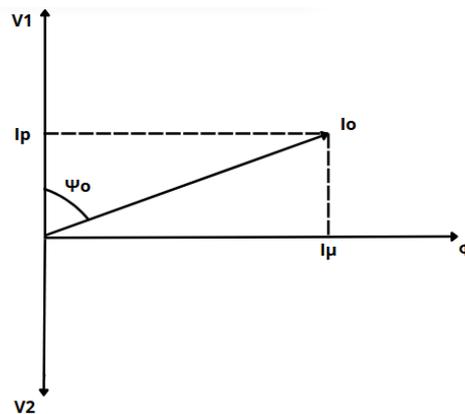
A compreensão dessa corrente de “*inrush*” é crucial. Por se tratar de uma corrente transitória de magnetização, ela influencia diretamente a proteção do sistema, podendo causar a atuação indevida dos relés de proteção caso não seja adequadamente considerada durante o seu ajuste. Adicionalmente, a corrente de “*inrush*” é caracterizada pela presença de componentes harmônicas, o que pode levar à ocorrência de fenômenos de ressonância no sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2013).

### 3.4 OPERAÇÃO A VAZIO

Quando um transformador é energizado, mas sem carga conectada ao seu enrolamento secundário (operação a vazio), ainda irá consumir uma corrente do lado primário, denominada corrente a vazio ( $I_0$ ). A corrente a vazio é reduzida, podendo alcançar até 8% da corrente nominal primária. (MAMEDE FILHO, 2013).

O diagrama vetorial apresentado na figura 6 ilustra a corrente a vazio, que é constituída por duas componentes, a corrente de magnetização do núcleo ( $I_\mu$ ) e a corrente que o transformador absorve pra equilibrar as perdas internas ( $I_p$ ). As perdas internas são ocasionadas devido às perdas por histerese e correntes de Foucault, conhecidas também como correntes parasitas (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 6: Diagrama vetorial da corrente a vazio.



Fonte: Mamede Filho, 2013. (Adaptado)

A corrente a vazio é composta por duas componentes principais:

- Corrente de Magnetização ( $I_{\mu}$ ): É a parcela reativa responsável por criar e manter o fluxo magnético no núcleo do transformador. Essa corrente é fundamental para induzir a tensão no enrolamento secundário e é predominantemente indutiva.
- Corrente Ativa ( $I_p$ ): É a parcela que supre as perdas no núcleo, as quais são convertidas em calor. Esta componente é predominantemente resistiva.

O ângulo entre  $I_p$  e  $I_o$  é simbolizada por “ $\Psi_o$ ”, conforme a figura 6. O cosseno do  $\Psi_o$  representa o fator de potência do transformador operando a vazio ( $F_{po}$ ), representado pela equação 12 (MAMEDE FILHO, 2013).

$$F_{po} = \cos (\Psi_o) \quad (12)$$

Considerando que o transformador está operando a vazio, o fator de potência será baixo e predominantemente indutivo. Isso ocorre porque a corrente de magnetização é significativamente mais elevada do que a corrente de perdas no núcleo, resultando em um ângulo de fase próximo a  $90^\circ$ .

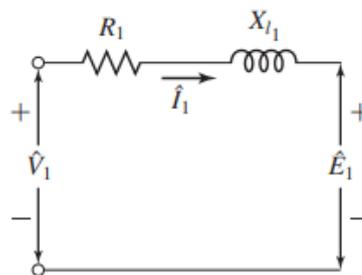
O fator de potência de um transformador operando a vazio é crucial para avaliar a qualidade do núcleo. Se a corrente de magnetização for dominante (o que implica em menores perdas), é um indicativo de que o núcleo do transformador possui uma qualidade adequada. No entanto, essa diferença entre as componentes deve ser proporcional aos padrões de mercado para transformadores; caso contrário, pode sugerir problemas de perdas excessivas no núcleo.

### 3.5 CIRCUITO EQUIVALENTE

Ao desenvolver o circuito equivalente, deve-se avaliar com maior complexidade o desempenho do transformador, além disso, definir as perdas presentes, realizando uma análise detalhada das perdas (UMANS, 2014).

A figura 7 apresenta o desenvolvimento inicial para analisar o circuito equivalente do transformador. Os terminais do primário apresentam uma tensão  $\hat{V}_1$ ,  $R_1$  é a resistência no primário,  $X_{l_1}$  representa o fluxo disperso e  $\hat{E}_1$  representa a Força Eletromotriz Induzida (FEM) no primário devido ao fluxo mútuo (UMANS, 2014).

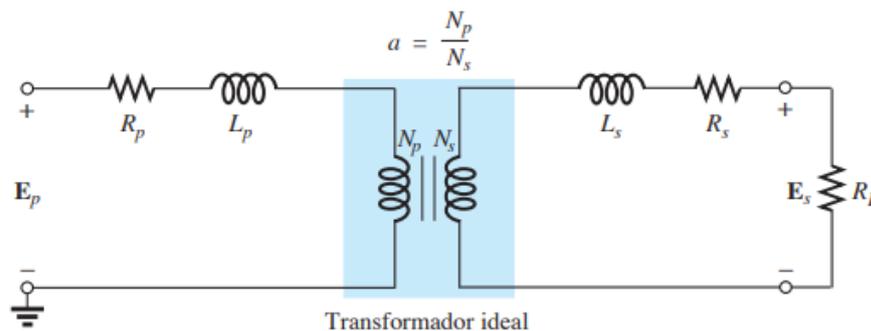
Figura 7: Circuito equivalente do primário



Fonte: Umans, 2014.

Analisando a relação das bobinas (Figura 8), nota-se que tanto os enrolamentos primário e secundário possuem resistência quanto uma parcela do fluxo magnético se dispersa. Isso implica que a potência fornecida no primário não será completamente transmitida ao secundário (BOYLESTAD, 2012)

Figura 8: Circuito equivalente considerando primário e secundário.

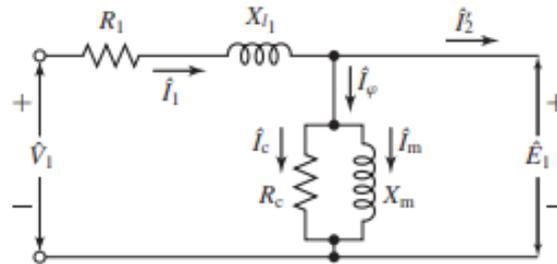


Fonte: Boylestad, 2012.

A corrente exercida no primário deve ser o suficiente para magnetizar o núcleo e proporcionar uma corrente no secundário para alimentação da carga. Desse modo, pode-se decompor a corrente do primário em dois tipos, a necessária para a carga e a corrente de excitação. Na figura 9, a corrente de excitação definida por  $\hat{I}_\phi$  representa a componente de

excitação citada anteriormente. A corrente  $\hat{I}_2$  é refletida do secundário para o primário, para representar a influência do secundário no sistema. (UMANS, 2014)

Figura 9: Circuito equivalente do primário com a reflexão do secundário



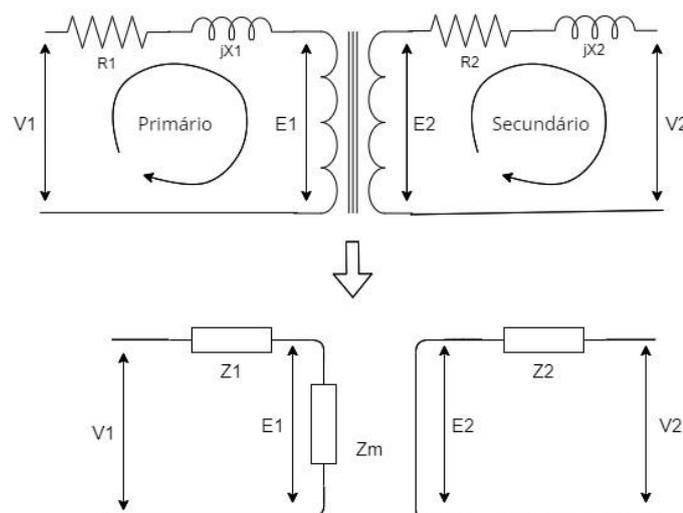
Fonte: Umans, 2014.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES E PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Com base no circuito equivalente citado anteriormente, podemos modifica-lo para obter dados específicos do ramo magnetizante do circuito e facilitar visualização para a compreensão do circuito.

A figura 10 representa o circuito equivalente de um transformador, reduzindo os parâmetros de resistência e reatância para impedância, simplificando a visualização. Retornando aos conceitos do transformador a vazio, quando o transformador não apresenta carga no secundário, a corrente a vazio ou excitação ( $I_o$ ) que atravessa o primário, representa um valor reduzido, assim, a queda de resistência e reatância podem ser desconsideradas, dessa forma,  $Z_1$  será reduzida e desprezada (NOVAIS, 2019).

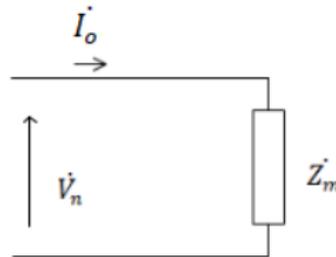
Figura 10: Modelagem de um circuito equivalente do transformador



Fonte: Elaboração própria, 2025.

O ramo magnetizante é deduzido conforme apresentado na figura 11, apresentando a impedância magnetizante na operação a vazio.

Figura 11: Circuito da operação a vazio em transformador



Fonte: Novais, 2019.

A impedância  $Z_m$  pode ser aplicada nas considerações do primário ou do secundário, tendo a atenção para considerar em apenas um enrolamento (BISPO, 2019). Assim a impedância pode ser definida como:

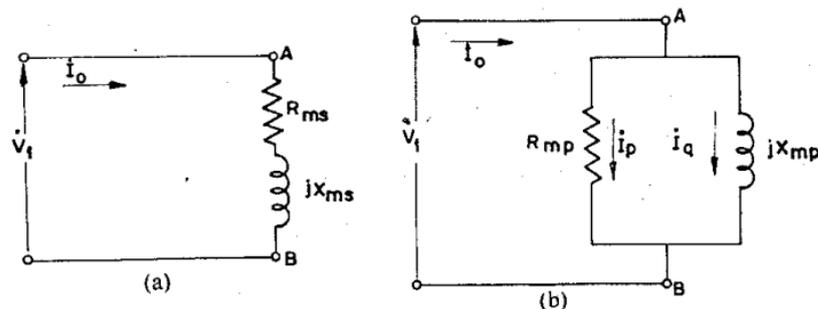
$$Z_m = \frac{V_n}{I_o} \quad (13)$$

Onde  $V_n$  representa a tensão nominal e  $I_o$  a corrente a vazio. Com isso, é possível retornar ao fator de potência que foi apresentada anteriormente na formulação 12:

$$F_{po} = \frac{P_o}{V_n \times I_o} \quad (14)$$

A obtenção do ramo magnetizante deve ser realizada considerando os elementos da impedância dissociados, como representado na figura 12, os elementos de reatância e resistência podem estar dispostos em série ou paralelo, entretanto, devem ser igualadas a impedância magnetizante (NOVAIS, 2019).

Figura 12: Associações do ramo magnetizante



Fonte: Oliveira, 1984.

Pode-se obter as seguintes equações em série:

$$P_o = R_{ms} \times I_o^2 \rightarrow R_{ms} = \frac{P_o}{I_o^2} \quad (16)$$

$$Z_{ms}^2 = R_{ms}^2 + X_{ms}^2 \rightarrow X_{ms} = \sqrt{Z_{ms}^2 - R_{ms}^2} \quad (17)$$

As equações a seguir correspondem a disposição em paralelo:

$$R_{mp} = \frac{V_1}{I_p} = \frac{P_o}{I_p^2} \quad (18)$$

$$X_{mp} = \frac{V_1}{I_q} \quad (19)$$

### 3.7 PERDAS NO FERRO

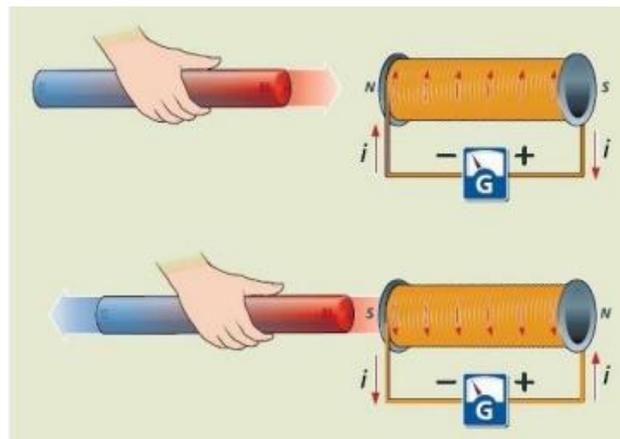
Os transformadores são dispositivos compostos por material ferromagnético, que são utilizados para obter campos magnéticos com alta intensidade. Com isso, o material pode ser submetido a saturação e a curva por histerese (PROTEÇÃO DOS TRANSFORMADORES – PARTE I, 2010). As perdas no ferro é uma consequência das correntes parasitas e a histerese.

#### 3.7.1 PERDAS POR CORRENTE PARASITA

Segundo Boylestad (2012), ao submeter um material a um fluxo magnético, será produzida uma força eletromagnética no material que se opõe a fonte que a produziu, tal fenômeno é descrito na Lei de Lenz.

Movimentando o ímã, de acordo com a figura 13, quando o ímã se aproxima da bobina, uma corrente é gerada na bobina, formando um campo magnético que repele o ímã. Por outro lado, ao afastar o ímã, um campo oposto é gerado na bobina, atraindo-o novamente (FERREIRA JUNIOR, 2016).

Figura 13: Lei de Lenz

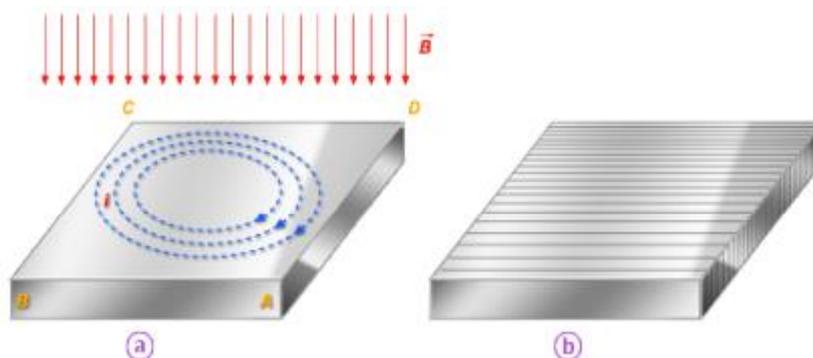


Fonte: Ferreira Junior, 2016.

Considerando a figura 14(a), uma chapa metálica é submetida a uma variação de fluxo magnético, produzindo uma corrente que circula no núcleo, essa corrente corresponde a uma corrente parasita que se opõe as variações de densidade de fluxo no material. O caso

apresentado na figura 14(b) representa lâminas do mesmo material, porém com uma ampla redução da influência da corrente parasita no material (UMANS,2013).

Figura 14: Corrente de Foucault



Fonte: Bispo, 2019.

Conforme o material ferromagnético é submetido a uma variação no fluxo, o material proporciona a produção de uma força magneto motriz, essa força produz uma corrente conhecida como corrente parasita (MARTIGNONI, 1969).

Sabendo que a corrente parasita gera uma perda de potência, pra reduzir os efeitos, o núcleo dos transformadores é constituído por múltiplas lâminas isoladas uma das outras, desse modo a FEM é mínima devido a seção transversal reduzida (MARTIGNONI, 1969).

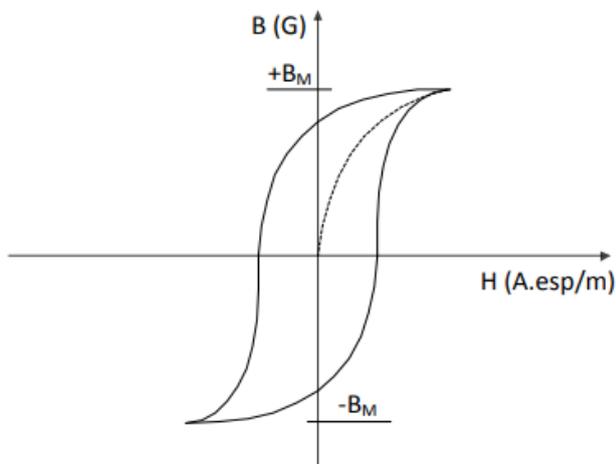
### 3.7.2 PERDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA

A curva de histerese é um comportamento da curva de magnetização - intensidade do campo magnético (H) pelo fluxo magnético (B) - produzido quando um material ferromagnético é exposto a uma corrente alternada (ARAUJO, 2009).

Os materiais ferromagnéticos possuem uma estrutura semelhante a um ímã reduzido, contendo os polos norte e sul desalinhados, assim, quando são submetidos a um campo externo, os polos se alinham de acordo com o campo magnético da bobina (MAMEDE FILHO, 2013).

O aumento da corrente na bobina tende a elevar o número de dipolos alinhados, podendo alcançar a saturação do material ferromagnético, conforme apresentado na figura 15, quando a curva alcança a saturação em “+Bm”. Quando a corrente da bobina aumenta, o campo magnético tende a aumentar, após retirar o campo magnético, a curva ainda apresenta um magnetismo residual. Após isso, ao inverter o campo magnético, o processo irá ocorrer de modo reverso, completando o ciclo histerético (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 15: Curva de Histerese



Fonte: Santos, 2012.

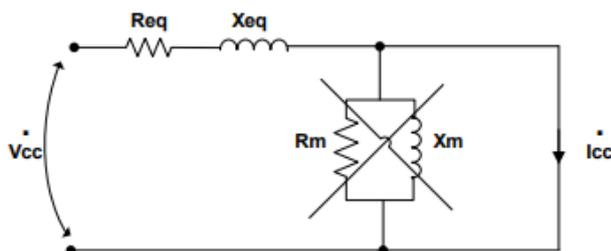
As perdas por histerese acontecem no momento que existe a necessidade de ceder energia do primário para o campo magnético que é dispersa em forma de calor (MAMEDE FILHO, 2013).

### 3.7.3 PERDAS NO COBRE

Segundo Oliveira (1984), as perdas no cobre dos enrolamentos primário e secundário são determinadas a partir dos valores das resistências  $r_1$  (primário) e  $r_2$  (secundário). No ensaio de curto-circuito, a corrente é estabelecida (geralmente a nominal) e a potência de perdas no cobre é medida. Os dados da placa do transformador (potência nominal, tensões nominais) são utilizados para calcular as correntes nominais e para referenciar os resultados obtidos à condição nominal de operação.

O ensaio de curto-circuito, ilustrado na Figura 16, é fundamental para a obtenção dos valores de perda no cobre. Esse ensaio deve ser realizado curto-circuitando um dos enrolamentos e aplicando uma tensão no enrolamento remanescente. Conforme Novais (2019), recomenda-se curto-circuitar o enrolamento de baixa tensão, preferencialmente, por razões de segurança e precisão dos equipamentos.

Figura 16: Circuito equivalente do ensaio do transformador em curto-circuito



Fonte: Novais, 2019.

Segundo Santos (2012), no ensaio de curto-circuito, a tensão aplicada é reduzida e a corrente de excitação (magnetização) é mínima, podendo ser desprezada. Desse modo, as perdas no ferro tornam-se insignificantes e as perdas medidas são predominantemente as perdas no cobre. Ao se ajustar a tensão aplicada até que a corrente nominal circule, é possível obter a resistência e a reatância equivalentes do transformador.

A impedância de curto-circuito ( $Z_{cc}$ ), calculada a partir da tensão e corrente medidas, é fundamental. Dela derivam a resistência equivalente ( $R_{eq}$ ), que permite calcular as perdas por efeito Joule ( $R_{eq} \times I^2$ ) devido à passagem da corrente nominal nos enrolamentos, e a reatância equivalente ( $X_{eq}$ ), que representa a dispersão do fluxo magnético. O circuito equivalente na Figura 16 mostra a resistência equivalente e a reatância equivalente, que representam os valores combinados dos enrolamentos primário e secundário. (NOVAIS, 2019).

Conforme Bispo (2019), as perdas nos enrolamentos (perdas no cobre), são determinadas através da equação (20):

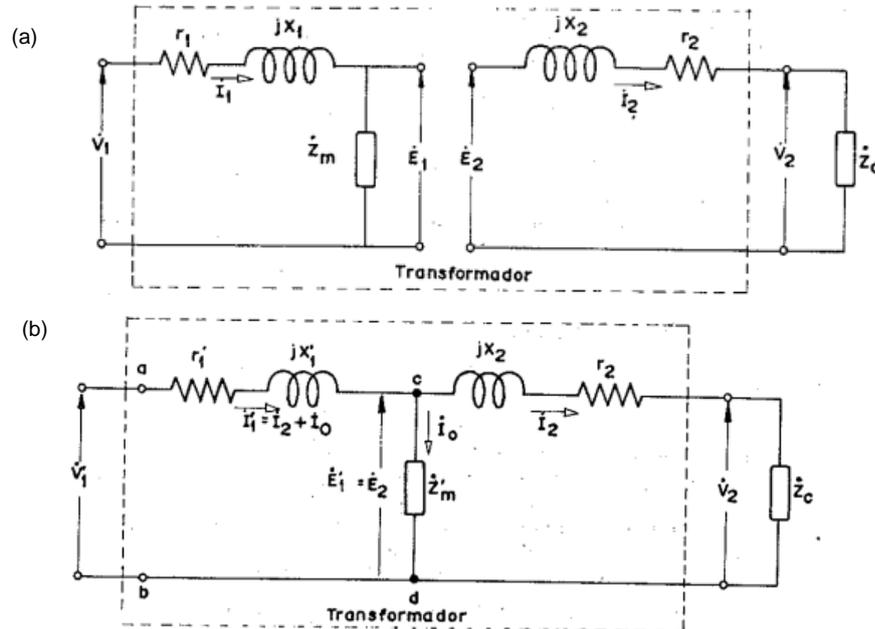
$$P_j = r_{1 \times I_1}^2 + r_{2 \times I_2}^2 \quad (20)$$

### 3.8 QUEDA DE TENSÃO

A análise da queda de tensão em um transformador ocorre em duas etapas, conforme proposto por Oliveira (1984). Inicialmente, no primário, a tensão de alimentação não se reflete integralmente na tensão induzida do primário, impactando subsequentemente a tensão induzida no secundário. A representação esquemática desta primeira etapa é detalhada na Figura 17(a).

Para simplificar a análise do circuito, as grandezas do primário são referidas ao secundário, conforme ilustrado na Figura 17(b), o que permite uma abordagem mais unificada do sistema.

Figura 17: Equivalente da queda de tensão



Fonte: Oliveira, 1984.

A corrente de excitação ou corrente a vazio ( $I_0$ ) é frequentemente desconsiderada devido ao seu valor ser mínimo em relação à corrente do secundário ( $I_2$ ) (OLIVEIRA, 1984). Ao referir os dados do primário para o secundário, obtemos as seguintes relações para tensão e corrente:

$$V_2 = V'_1 = \frac{V_1}{K} \quad (21)$$

$$I_2 = I'_1 = KI_1 \quad (22)$$

Com base nessas relações, as equações para impedância, resistência e reatância podem ser modificadas:

$$Z'_1 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_1/K}{KI_1} = \frac{V_1}{I_1} K^{-2} = Z_1 K^{-2} \quad (23)$$

$$R'_1 = R_1 K^{-2} \quad (24)$$

$$jX'_1 = jX_1 K^{-2} \quad (25)$$

Considerando uma pequena queda de tensão para o primário, conforme Oliveira (1984), a queda de tensão total pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\Delta V = Z_2 I_2 \quad (26)$$

### 3.9 MÉTODO DA SOMA DUPLAMENTE PONDERADA NORMALIZADA (SDPN)

O método da Soma Duplamente Ponderada Normalizada (SDPN), proposto por André Pereira Marques, é uma ferramenta avançada para o diagnóstico otimizado de transformadores de potência. Seu principal objetivo é realizar uma avaliação abrangente da condição do equipamento.

O SDPN emprega uma abordagem que integra dados de diversas técnicas preditivas de diagnóstico. Ele se destaca por atribuir ponderações em dois níveis: tanto às diferentes técnicas e parâmetros analisados quanto aos critérios de classificação de cada resultado. Esse processo permite que o método transforme uma série de dados de ensaios em um índice unificado da "saúde" do transformador, otimizando significativamente a tomada de decisões e o gerenciamento de ativos.

## 4 ENSAIOS ELÉTRICOS BÁSICOS EM TRANSFORMADORES

### 4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS

O microhmímetro é um equipamento que utiliza o método dos quatro terminais, conhecido como método de Kelvin, possibilitando uma medição mais precisa, minimizando os efeitos do cabo de prova e a resistência de contato (MEGABRAS, 2023).

O ensaio consiste em posicionar as pontas de prova entre os enrolamentos de alta tensão, após isso, entre os enrolamentos de baixa tensão, conforme apresentado na figura 18. O equipamento irá injetar uma corrente contínua conhecida, conforme definido previamente e apresentará uma resistência no visor conforme a queda de tensão. Para garantir maior precisão nos resultados, deve-se validar a fixação das pontas de prova e garantir que os terminais das bobinas estejam limpos corretamente. O resultado deve ser coletado após um minuto da medição, juntamente com os dados de temperatura do ambiente.

Figura 18: Ensaio de resistência dos enrolamentos nos enrolamentos



Fonte: W3 Elétrica, 2024.

O procedimento de ensaio consiste em aplicar uma corrente elétrica contínua nos terminais do transformador para obter a resistência dos enrolamentos. O dispositivo de teste irá obter a tensão e corrente, calculando a resistência pela Lei de Ohm (PAULINO, 2024).

Após a realização dos testes, o valor deve ser corrigido para a temperatura de referência e comparar os valores com os dados fornecido pelo fabricante ou obter o registro histórico do transformador (ABNT, 2007).

Segundo a ABNT (2007), a correção da resistência deve ser efetuada da seguinte forma para transformadores a óleo:

$$R_r = R_1 \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_1} \quad (26)$$

Sendo que:

- $\theta_r$ : Temperatura de referência – para transformadores a óleo é 75°C;
- $\theta_1$ : Temperatura registrada no momento do ensaio;
- $R_1$ : Resistência registrada durante o ensaio.

Segundo Paulino (2014), a validação dos dados pode ser realizada com uma relação entre a diferença entre o valor ensaiado e a resistência de referência, que é um valor fornecido pelo fabricante ou pelo histórico do transformador. Caso o valor for menor que 3%, os valores estão aceitáveis, caso a resistência se encontre entre 3% e 5%, o ensaio deve ser repetido e o valor investigado, por fim, se ultrapassar 5%, pode significar a presença de um defeito.

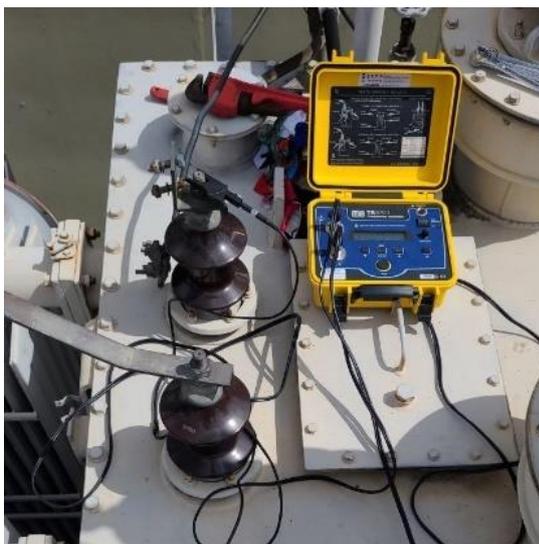
#### 4.2 ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

A relação de transformação é um parâmetro fundamental para validar o estado das bobinas em um transformador. Durante os ensaios, é amplamente empregado o "Transformer Turn Ratio Test" (TTR), conforme referenciado por Carrião (2024).

Em transformadores trifásicos, os enrolamentos primário e secundário podem apresentar diferentes configurações de ligação, conforme especificado pelo fabricante. As ligações mais comuns para as bobinas são estrela (Y), triângulo ou delta (D) e zigue-zague (Z) (Mamede Filho, 2013).

O ensaio TTR é realizado conectando as pontas de prova do equipamento, como ilustrado na Figura 19. A configuração das pontas de prova é diretamente dependente do tipo de ligação definido na fabricação do transformador. Após o posicionamento correto nas bobinas do primário e do secundário, o resultado obtido deve ser validado em comparação com a relação teórica esperada.

Figura 19: Ensaio de relação de transformação



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

O objetivo principal deste ensaio é obter a relação de transformação para transformadores trifásicos ( $K_N$ ), que se baseia na relação de espiras ( $K$  da Equação 7) e é calculada conforme as diretrizes apresentadas na Tabela 1.

A Tabela 1 detalha as diferentes configurações de ligação, onde a letra maiúscula representa o enrolamento primário e a minúscula, o secundário. A letra "D" simboliza a ligação delta, "Y" a estrela e "Z" o zigue-zague. Após determinar a relação de espiras ( $K$ ) pela Equação (7), a relação de transformação final para o ensaio ( $K_N$ ) deve ser obtida conforme as instruções da Tabela 1 (PAULINO, 2024).

Tabela 1: Relação de transformação

Ligação	Dd	Dy	Dz	Yy	Yd	Yz
$K_N =$	$K$	$\frac{K}{\sqrt{3}}$	$\frac{2K}{3}$	$K$	$\sqrt{3}K$	$\frac{2K}{\sqrt{3}}$

**Fonte:** Paulino, 2024. (Adaptado)

Além dos aspectos já mencionados, é crucial verificar a posição do "tap" no comutador do transformador. O "tap" refere-se à posição do regulador de tensão, que permite alterar a relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário. A variação do "tap", portanto, modifica a configuração da tensão de alimentação no primário (CARRIÃO, 2024).

$$E\% = \frac{R_m - R_p}{R_p} * 100\% \quad (27)$$

- $R_m$ : Relação obtida nos ensaios;
- $R_p$ : Relação teórica, obtida através dos dados de placa.

O indicado pela ABNT 2007 é uma tolerância de 0,5% para a relação de transformação teórica e a prática. Assim, pode-se utilizar o cálculo de erro para obter essa relação (CARRIÃO, 2024).

#### 4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

O ensaio de resistência de isolamento é fundamental para avaliar a condição do material isolante de um transformador. Sua execução envolve inicialmente o curto-circuito das bobinas do primário entre si e, separadamente, as bobinas do secundário entre si. Em seguida, as pontas de prova são posicionadas em três configurações distintas: primário para o secundário, primário para a carcaça e, por fim, secundário para a carcaça. Uma tensão correspondente é aplicada a cada bobina e os valores de resistência são registrados nos tempos de 30 segundos, 1 minuto e 10 minutos. A Figura 20 ilustra o ensaio de resistência de isolamento da bobina de alta tensão para a carcaça do transformador.

Figura 20: Ensaio de resistência de isolamento



Fonte: W3 Elétrica, 2024.

Conforme Marques (2018), a resistência de isolamento de um transformador pode ser influenciada por diversos fatores, como temperatura, presença de partículas na superfície, aumento da umidade e degradação do material isolante. Para fins de comparação com bases existentes, dados históricos ou testes iniciais fornecidos pelo fabricante, é necessário transformar a resistência de isolamento da temperatura de teste para uma temperatura de referência. A correção da temperatura pode ser realizada da seguinte forma para 20°C:

$$R_{20^{\circ}C} = R_T * K_T \quad (28)$$

- $R_{20^{\circ}C}$ : Resistência objetivo na temperatura de 20°C em MΩ;

- $R_T$ : Resistência obtida no ensaio em  $M\Omega$ ;
- $K_T$ : Fator de correção da temperatura desejada.

A obtenção do valor do fator de correção da temperatura é obtida conforme a formulação 29:

$$K_T = 0,23991 * e^{\frac{T}{14,3207}} + 0,0222 \quad (29)$$

- $T$  : Temperatura registrada durante os ensaios em  $^{\circ}C$ .

De acordo com Carrião (2024), a resistência ôhmica é medida por meio de um equipamento conhecido como Megôhmetro, que é utilizado para realizar a medição da resistência de isolamento do transformador. O ensaio é realizado curto-circuitando separadamente os terminais do primário e do secundário e aplicando uma tensão, durante 1 minuto, com no mínimo 1kV para equipamentos inferiores a 72,5kV e aplicando no mínimo 2kV para transformadores com tensão superior a 72,5kV (ABNT, 2007).

A tabela 2 apresenta valores para fins de comparação fornecidos por Marques (2018) após desenvolver o método denominado de Soma Duplamente Ponderada Normatizada (SDPN) que estabelece critérios recomendados para os valores de resistência de isolamento. Na tabela 2, os valores são para resistências do primário para o secundário com base na idade, com a temperatura referenciada para  $20^{\circ}C$ .

Tabela 2: Valores para Rab com base na idade

Conceito	Idade $\leq 10$ anos	10 anos < idade $\leq 20$ anos	Idade > 20 anos
A (Excelente)	$R_{AB} \geq 41.743 M\Omega$	$R_{AB} \geq 20.085 M\Omega$	$R_{AB} \geq 13.233 M\Omega$
B (Bom)	$20.112 M\Omega \leq R_{AB} < 41.743 M\Omega$	$12.359 M\Omega \leq R_{AB} < 20.085 M\Omega$	$6.738 M\Omega \leq R_{AB} < 13.233 M\Omega$
C (Marginal)	$15.135 M\Omega \leq R_{AB} < 20.112 M\Omega$	$8.674 M\Omega \leq R_{AB} < 12.359 M\Omega$	$4.972 M\Omega \leq R_{AB} < 6.738 M\Omega$
D (Ruim)	$5.369 M\Omega \leq R_{AB} < 15.135 M\Omega$	$3.318 M\Omega \leq R_{AB} < 8.674 M\Omega$	$2.051 M\Omega \leq R_{AB} < 4.972 M\Omega$
E (Péssimo)	$R_{AB} < 5.369 M\Omega$	$R_{AB} < 3.318 M\Omega$	$R_{AB} < 2.051 M\Omega$

Fonte: Marques, 2018

A tabela 3 também apresenta valores de resistência de isolamento adequadas com base na idade, semelhante a tabela 2, entretanto com a diferenciação que se trata de resultados indicados para medições do primário ou do secundário para a carcaça do transformador.

Tabela 3: Valores para R com base na idade

Conceito	Idade ≤ 10 anos	10 anos < idade ≤ 20 anos	Idade > 20 anos
A (Excelente)	$R \geq 24.100 \text{ M}\Omega$	$R \geq 11.596 \text{ M}\Omega$	$R \geq 7.640 \text{ M}\Omega$
B (Bom)	$11.612 \text{ M}\Omega \leq R < 24.100 \text{ M}\Omega$	$7.135 \text{ M}\Omega \leq R < 11.596 \text{ M}\Omega$	$3.890 \text{ M}\Omega \leq R < 7.640 \text{ M}\Omega$
C (Marginal)	$8.738 \text{ M}\Omega \leq R < 11.612 \text{ M}\Omega$	$5.008 \text{ M}\Omega \leq R < 7.135 \text{ M}\Omega$	$2.870 \text{ M}\Omega \leq R < 3.890 \text{ M}\Omega$
D (Ruim)	$3.100 \text{ M}\Omega \leq R < 8.738 \text{ M}\Omega$	$1.916 \text{ M}\Omega \leq R < 5.008 \text{ M}\Omega$	$1.184 \text{ M}\Omega \leq R < 2.870 \text{ M}\Omega$
E (Péssimo)	$R < 3.100 \text{ M}\Omega$	$R < 1.916 \text{ M}\Omega$	$R < 1.184 \text{ M}\Omega$

Fonte: Marques, 2018

Apesar da norma IEEE (2013) informar que não existe dados exatos para a resistência de isolamento, a recomendação é avaliar os dados históricos do transformador para avaliar a tendência, Marques (2018) realiza uma análise por meio de estudos estatísticos para a criação da tabela 2 e 3.

Outro fator importante para a análise dos dados de resistência de isolamento é a avaliação dos índices de polarização e absorção, que avaliam com uma precisão maior o nível de deterioração do equipamento.

O índice de absorção ( $I_a$ ) é obtido após a coleta dos resultados de resistência de isolamento em um minuto e 30 segundos. É necessária para realizar uma avaliação prévia do estado do transformador, fornecendo uma visão geral do estado de conservação do isolamento (SOUZA, 2018).

$$I_a = \frac{R_{60 \text{ seg}}}{R_{30 \text{ seg}}} \quad (30)$$

- $I_a$ : Índice de absorção;
- $R_{60 \text{ seg}}$ : Resistência de isolamento registrada no ensaio em 60 segundos;
- $R_{30 \text{ seg}}$ : Resistência de isolamento registrada no ensaio em 30 segundos;

O índice de absorção é influenciado diretamente por contaminantes na superfície e a presença de umidade, reduzindo a capacidade de isolamento (SOUZA, 2018).

A tabela 4 apresenta o método SDPN de Marques (2018) a margem dos resultados para classificar o estado do transformador com base na idade. Quanto maior o índice de absorção, melhor a classificação do transformador (SOUZA, 2018).

Tabela 4: Valores base para o índice de absorção

Conceito	idade ≤ 5 anos	5 < idade ≤ 10 anos	idade > 10 anos
A (Excelente)	$IA \geq 1,600$	$IA \geq 1,520$	$IA \geq 1,440$
B (Bom)	$1,350 \leq IA < 1,600$	$1,520 \leq IA < 1,283$	$1,215 \leq IA < 1,440$
C (Marginal)	$1,250 \leq IA < 1,350$	$1,188 \leq IA < 1,283$	$1,125 \leq IA < 1,215$
D (Ruim)	$1,100 \leq IA < 1,250$	$1,045 \leq IA < 1,188$	$1,000 \leq IA < 1,125$
E (Péssimo)	$IA < 1,100$	$IA < 1,045$	$IA < 1,000$

Fonte: Marques, 2018

O índice de polarização ( $I_p$ ) é a relação entre a resistência de isolamento registrada em 10 minutos pelo dado registrado em um minuto (SOUZA, 2018).

$$I_p = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}} \quad (30)$$

- $I_p$ : Índice de polarização;
- $R_{10 \text{ min}}$ : Resistência de isolamento registrada no ensaio em 10 minutos;
- $R_{1 \text{ min}}$ : Resistência de isolamento registrada no ensaio em 1 minuto;

O índice de polarização apresenta uma precisão maior que o índice de absorção (SOUZA, 2018).

A tabela 5 é respectivo novamente ao método SDPN para os valores de classificação para o índice de polarização com base na idade. Assim como o índice de absorção, quanto maior o resultado apresentado, melhor a condição de preservação do isolamento (SOUZA, 2018).

Tabela 5: Valores base para o índice de polarização

Conceito	Idade ≤ 5 anos	5 anos < idade ≤ 10 anos	Idade > 10 anos
A (Excelente)	$IP \geq 3,070$	$IP \geq 2,045$	$IP \geq 1,850$
B (Bom)	$2,333 \leq IP < 3,070$	$1,667 \leq IP < 2,045$	$1,500 \leq IP < 1,850$
C (Marginal)	$1,720 \leq IP < 2,333$	$1,400 \leq IP < 1,667$	$1,286 \leq IP < 1,500$
D (Ruim)	$1,294 \leq IP < 1,720$	$1,201 \leq IP < 1,400$	$1,151 \leq IP < 1,286$
E (Péssimo)	$IP < 1,294$	$IP < 1,201$	$IP < 1,151$

Fonte: Marques, 2018

## 5 RESULTADOS E DISCURSÕES

As informações são apresentadas a partir de dados coletados em manutenções preventivas executadas em diferentes fábricas, podendo conter falha humana e interferência dos equipamentos de ensaio. Apesar disso, todos os dados foram coletados visando a precisão, com equipamentos calibrados e profissionais qualificados para realização dos testes.

### 5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS

A aplicação prática deste ensaio é demonstrada pela coleta de dados de um transformador de 225kVA da fabricante CAMEC. Espera-se que os resultados das análises apresentem valores similares para todos os enrolamentos, considerando que possuem a mesma quantidade de espiras e, conseqüentemente, propriedades e resistências semelhantes. A configuração do ensaio é definida conforme a necessidade e fatores como o fechamento do transformador. Os resultados dos ensaios foram referenciados para a temperatura de 75°C.

A Figura 21 ilustra a realização do ensaio, com as pontas de prova posicionadas nos terminais da bobina de alta tensão do transformador. Por se tratar de um transformador abaixador de tensão, o ensaio é conduzido na bobina do primário.

Figura 21: Ensaio de resistência dos enrolamentos (TR225)



**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

Os dados foram coletados e registrados na Tabela 6. A coluna "Modo de medição" (coluna 3) detalha a configuração, enquanto a coluna "Resultado do ensaio" (coluna 4) apresenta os valores obtidos em campo. Ao analisar e tratar os dados do transformador de 225kVA, conforme demonstrado na Tabela 6, observa-se que o enrolamento primário (H1-H2, H1-H3, H2-H3) apresenta resultados com desvio menor que 3%, indicando uma aprovação na análise inicial.

Tabela 6: Resultado da Análise para o Transformador de 225kVA

Data do ensaio	Modo de Ensaio	Modo de medição	Resultado do Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Corrigida	Desvio (%)	Status
13/02/2023	Enrolamento primário	H1-H2	10,30 Ω	29,5	18,108 Ω	2,79	Aprovado
		H1-H3	10,60 Ω	29,6	18,628 Ω		
		H2-H3	10,50 Ω	29,6	18,452 Ω		
	Enrolamento secundário s/ neutro acessível	X1-X2	9,54 mΩ	29,7	5,586 mΩ	3,48	Ensaio deve ser repetido e resultado investigado
		X1-X3	9,17 mΩ	28,6	5,392 mΩ		
		X2-X3	9,30 mΩ	29,7	5,446 mΩ		
07/11/2023	Enrolamento primário	H1-H2	10,65 Ω	29,7	18,702 Ω	1,04	Aprovado
		H1-H3	10,65 Ω	29,8	18,693 Ω		
		H2-H3	10,53 Ω	29,5	18,507 Ω		
	Enrolamento secundário s/ neutro acessível	X1-X2	65,44 mΩ	29,2	38,392 mΩ	85,72	Reprovado
		X1-X3	50,44 mΩ	28,8	29,637 mΩ		
		X2-X3	9,37 mΩ	29,9	5,482 mΩ		

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Entretanto, o enrolamento secundário apresentou um alarme no primeiro ensaio (13/02/2023), com um desvio de 3,48%, indicando a necessidade de repetição e investigação. Após a reamostragem em 07/11/2023, o resultado do secundário demonstrou uma reprovação clara, com um desvio superior a 5% (85,72%). É crucial que todos os equipamentos utilizados nos ensaios tenham sua calibração válida, dentro do período de vigência.

Outros fatores podem influenciar a precisão dos dados, como o manuseio inadequado do equipamento, o posicionamento dos terminais, a validação da conexão dos cabos e a interferência de resíduos nos conectores do transformador (por exemplo, oxidação do cobre). Portanto, é imprescindível preparar a região a ser ensaiada, lixando e limpando-a antes de realizar a medição.

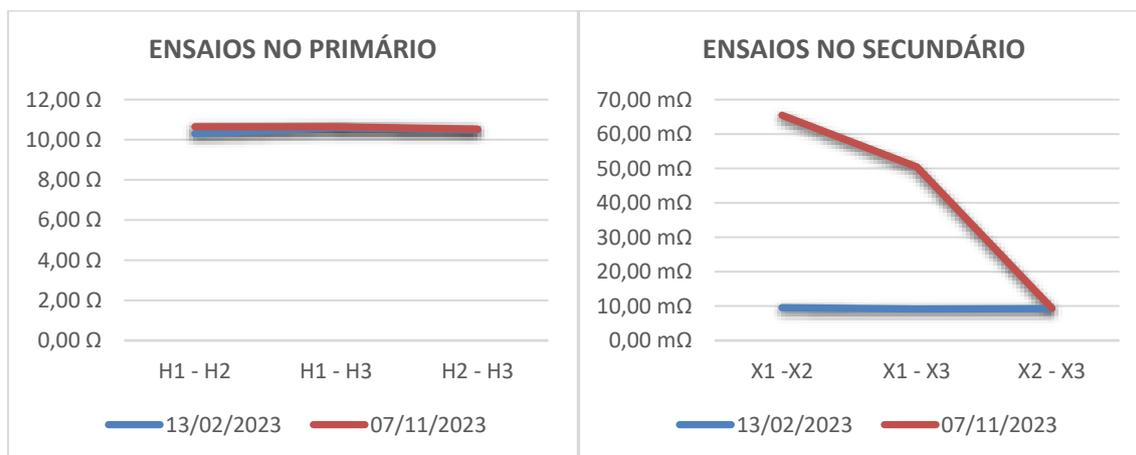
Um parâmetro essencial para a conferência e validação dos dados é a comparação com valores históricos do transformador, ou seja, com ensaios realizados anteriormente. Essa comparação permite verificar se houve alguma alteração crítica que possa impactar negativamente a operação.

Conforme a Figura 22, é possível observar a diferença dos resultados dos ensaios nos enrolamentos. Enquanto o primário apresenta variações em decimais, com erros mínimos e

consistência ao longo do tempo, o secundário mostra variações em dezenas, indicando um erro significativamente maior e uma drástica alteração em relação ao registro histórico.

Os gráficos da figura 22 também apresentam o registro histórico para fins de comparação, podendo realizar uma validação se houve decaimento da resistência de isolamento com o tempo. Conforme apresentado, as bobinas de alta tensão não apresentaram uma diferença alarmante da curva em relação ao tempo, entretanto a bobina de baixa tensão apresentou valores muito divergentes com o registro histórico.

Figura 22: Gráficos comparativos dos ensaios de resistência dos enrolamentos.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Valores tão divergentes são um alerta que indica a necessidade de intervenção no transformador, podendo ser ocasionados por corrosão, conexões soltas, danos internos nos enrolamentos ou problemas no isolamento. Em primeira instância, é recomendado repetir o ensaio com outro equipamento para validar a divergência observada.

## 5.2 ENSAIO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

A figura 23 apresenta o ensaio de relação de transformação realizada no mesmo transformador informado anteriormente (225kVA da fabricante CAMEC). Em primeira instância, foi registrado os dados de tensão para calcular a relação teórica do transformador, assim, durante os ensaios é possível verificar qual o valor necessário para obter maior precisão durante as medições.

Figura 23: Ensaio de relação de transformação (TR225)



Fonte: Autoria Própria, 2023.

A avaliação do transformador é obtida a partir do estudo do erro médio entre os valores teóricos e os práticos da relação de espiras. Os dados base são informados de acordo com os dados da placa da figura 24, coletando as informações da tensão primária do transformador, posição do comutador e esquema de ligação do transformador.

Figura 24: Dados da placa do transformador de 225kVA

ALTA TENSÃO					TERMINAIS H1 H2 H3		
V	A	Pos.	Comutador liga			Lig.	
13800	9,413	1	10-13	11-14	12-15		
13200	9,847	2	13-7	14-8	15-9		
12600	10,291	3	7-16	8-17	9-18		
12000	10,835	4	16-4	17-5	18-6		
11400	11,400	5	4-19	5-20	6-21		
BAIXA TENSÃO					TERMINAIS X0 X1 X2 X3		
V	A	Ligação					
380	9,413	Y					

Massas aproximadas em kg

Fonte: Autoria Própria, 2023.

O transformador está em operação na posição 1 de operação, logo a tensão do primário é 13,8kV e o secundário é 380V.

$$\text{relação de transformação} = \frac{13.800V}{380V} * \sqrt{3} = 62,90$$

Outro modo de avaliar é analisando a corrente primária e secundária para obter a relação teórica do transformador, que também podem ser obtidas na placa do transformador.

$$I_{\text{primario}} = \frac{\text{Potência (kVA)}}{\text{tensão do primário (kV)} * \sqrt{3}} = \frac{225\text{kVA}}{13,8\text{kV} * \sqrt{3}} = 9,413\text{A}$$

A corrente no primário está com valores similares ao da placa do transformador, obtendo o resultado de 9,413 A.

$$I_{\text{secundário}} = \frac{\text{Potência (kVA)}}{\text{tensão do secundário (kV)} * \sqrt{3}} = \frac{225\text{kVA}}{0,38\text{kV} * \sqrt{3}} = 341,852\text{A}$$

O valor da corrente no secundário está similar ao apresentado na placa de informações do transformador, com valor de 341,8A.

$$\text{relação de transformação} = \frac{I_p}{I_s} * \sqrt{3} = \frac{341,852}{9,413} * \sqrt{3} = 62,90$$

A relação de transformação obtida é semelhante ao apresentado anteriormente, assim é possível validar os dois modos de obter os resultados da relação de transformação teórica.

Os dados apresentados na tabela 7 são referentes ao histórico de um transformador a óleo de 225kVA com dois anos de manutenções preventivas, onde coletou-se informações do ensaio de relação de transformação a partir do TTR.

Tabela 7: Dados Coletados das Manutenções Periódicas

<b>Data do registro</b>	<b>18/04/2022</b>	<b>13/02/2023</b>	<b>07/11/2023</b>
<b>H1-H3/X1 - X0</b>	63,27	63,50	63,00
<b>H2-H1/X2 - X0</b>	63,30	63,54	63,01
<b>H3-H2/X3 - X0</b>	63,10	63,29	62,76

**Fonte:** Elaboração Própria, 2025.

Os ensaios, conforme avaliados na tabela 8, apresentaram erros menores que a tolerância de 0,5% para o dia 07 de novembro de 2023, com todos os resultados adequados para operação do transformador. O erro negativo representa que o transformador está entregando a tensão inferior ao esperado e o erro positivo é o inverso.

Tabela 8: Validação do estado das bobinas

Data do ensaio	Ensaio	Resultado do Ensaio	Relação Teórica	Erro	Status
18/04/2022	H1-H3/X0-X1	63,27:1	62,90:1	-0,59%	Reprovado
	H2-H1/X0-X2	63,30:1		-0,63%	Reprovado
	H3-H2/X0-X3	63,10:1		-0,32%	Aprovado
13/02/2023	H1-H3/X0-X1	63,50:1		-0,95%	Reprovado
	H2-H1/X0-X2	63,54:1		-1,02%	Reprovado
	H3-H2/X0-X3	63,29:1		-0,62%	Aprovado
07/11/2023	H1-H3/X0-X1	63,00:1		-0,16%	Aprovado
	H2-H1/X0-X2	63,01:1		-0,17%	Aprovado
	H3-H2/X0-X3	62,76:1		0,22%	Aprovado

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

Os resultados reprovados do dia 18 de abril de 2022 e 13 de fevereiro de 2023 estão acima do limite estabelecido por norma, podendo comprometer a segurança da instalação ao apresentar subtensão. Caso a reprova apresentasse o erro positivo, é igualmente danoso para as instalações, podendo apresentar sobretensão nos equipamentos.

Conforme a Figura 25, é possível avaliar que os resultados de 18/04/2022 e 13/02/2023 apresentaram modificações em comparação com a coleta de informações mais recente, o que pode indicar um agravamento no problema do transformador. No entanto, os resultados registrados no TTR em 07/11/2023 permaneceram dentro do parâmetro de tolerância estabelecido por norma (0,5%).

Figura 25: Gráfico de Erro Médio no Ensaio de Relação de Transformação



Fonte: Elaboração Própria, 2025.

Com base nos valores obtidos em 07/11/2023, que se encontram dentro dos limites estabelecidos, pode-se inferir que o transformador está operante. Contudo, essa conformidade não garante a eliminação de um problema subjacente. Os erros elevados

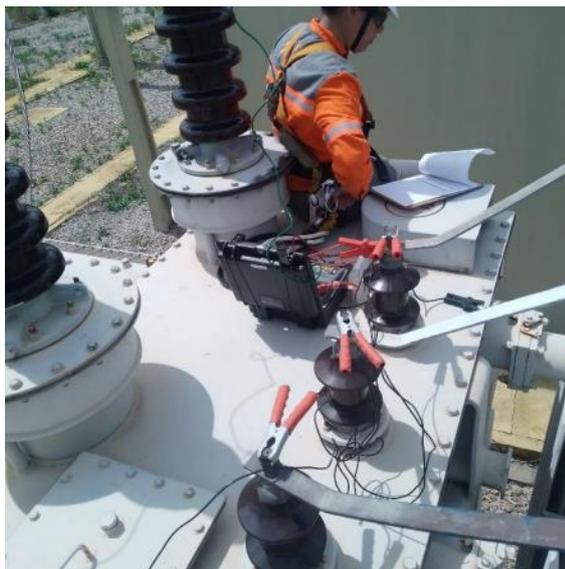
registrados em 18/04/2022 e 13/02/2023 são indicativos de uma anomalia mais grave, como um curto-circuito entre as espiras ou uma falha de conexão.

### 5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

A resistência de isolamento é realizada com um equipamento conhecido como megôhmetro, utilizando a corrente contínua para os ensaios. A análise dos dados do transformador será com base nos dados de referência fornecidos por Marques (2018), logo, será necessário realizar o tratamento dos dados para uma temperatura de referência utilizada pelo autor, assim, os dados terão a base de 20°C.

O transformador ensaiado, conforme demonstrado na figura 26, trata-se de um equipamento fabricado em 1988, o ensaio realizado em 2024, assim, o transformador está em operação há 36 anos. A idade do transformador influencia diretamente nos resultados de isolamento, devendo-se considerar a perda de isolamento devido ao desgaste do equipamento.

Figura 26: Ensaio de resistência de isolamento (TR7500)



**Fonte:** Autoria Própria, 2024.

A tabela 9 apresenta os valores obtidos em campo, sem a correção de temperatura. Observa-se que todos os valores de resistência de isolamento, em todas as configurações (AT/BT, AT/MASSA e BT/MASSA) e tempos, estão na faixa dos Megaohms, e para AT/BT e BT/MASSA, chegam a valores próximos de Gigaohms (milhares de  $M\Omega$ ).

Tabela 9: Dados coletados em campo

Dados coletados em campo		AT/BT		AT/MASSA		BT/MASSA	
Resultado	30 s	6630,0	MΩ	4400,0	MΩ	5010,0	MΩ
	1 min	12500,0	MΩ	5400,0	MΩ	8470,0	MΩ
	10 min	13500,0	MΩ	5470,0	MΩ	10310,0	MΩ

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

A tabela 10 apresenta os valores de resistência de isolamento corrigidas para uma temperatura de 20°C e comparadas com os valores mínimos de resistência de isolamento indicados para um transformador com idade maior que 10 anos. Os resultados possuem valores satisfatórios para o ensaio de resistência de isolamento, alcançando os valores mínimos.

Tabela 10: Valores referenciados para 20°C e classificados de acordo com a idade

Correção da temperatura para 20°C				Classificação do isolamento para >20 anos
AT/BT	30 s	198040,7	MΩ	<i>Excelente</i>
	1 min	373379,9	MΩ	<i>Excelente</i>
	10 min	403250,3	MΩ	<i>Excelente</i>
AT/MASSA	30 s	131429,7	MΩ	<i>Excelente</i>
	1 min	161300,1	MΩ	<i>Excelente</i>
	10 min	163391,0	MΩ	<i>Excelente</i>
BT/MASSA	30 s	149650,7	MΩ	<i>Excelente</i>
	1 min	253002,2	MΩ	<i>Excelente</i>
	10 min	307963,7	MΩ	<i>Excelente</i>

Fonte: Elaboração Própria, 2025.

Os resultados de resistência de isolamento não é um critério que reprova o transformador (ABNT, 2007). Entretanto, é possível analisar e realizar uma avaliação dos dados para fins de comparação.

Os ensaios entre o primário e o secundário estão elevados, podendo ser considerado adequada pra a idade do transformador. Ao se comparar o ensaio dos polos para massa, existe uma redução do isolamento, entretanto ainda é considerado adequada. A massa do transformador envolve uma área relativamente maior e está sujeita a presença de umidade.

Apesar dos resultados estarem adequados para operação, é indicado realizar uma comparação histórica com os dados para analisar a tendência dos valores.

Após a validação dos resultados de resistência de isolamento, existem mais fatores que auxiliam para avaliação do transformador como o índice de polarização e absorção.

A tabela 11 apresenta o resultado “Ip” (Índice de Polarização), que é a relação entre os resultados obtidos durante os ensaios da resistência de isolamento no tempo de 10 minutos

pelo valor obtido em 1 minuto de ensaio das relações AT/BT, AT/MASSA e BT/MASSA, referindo-se as bobinas do primário como “AT” (Alta Tensão), as bobinas do secundário como “BT” (Baixa Tensão) e “Massa” correspondendo a carcaça do transformador.

Tabela 11: Avaliação do índice de polarização

	<b>R10 min (MΩ)</b>	<b>R1m in (MΩ)</b>	<b>Ip</b>	<b>Condiç ão segundo Megger</b>	<b>Condiç ão segundo IEE43</b>
<b>AT/BT</b>	4032 50,3	3733 79,9	1, 080	Questio nável	Pobre
<b>AT/MASSA</b>	1633 91,0	1613 00,1	1, 013	Questio nável	Pobre
<b>BT/MASSA</b>	3079 63,7	2530 02,2	1, 217	Questio nável	Questio nável

**Fonte:** Elaboração Própria, 2025.

O índice de polarização para AT/BT, AT/Massa e BT/Massa apresentaram valores questionáveis segundo a tabela de classificação de Megger e condição pobre para AT/BT e AT/Massa segundo a IEE43.

O índice de polarização representa o estado de degradação do equipamento, os valores abaixo do indicado representam a existência de contaminação ou a presença de umidade.

A tabela 12 apresenta o índice de absorção do transformador, Ia. O índice de absorção é a relação direta entre os valores obtidos no ensaio de resistência de isolamento em um minuto e 30 segundos. O transformador apresentou valores adequados para prosseguir em operação, quanto maior o índice de absorção, melhor o isolamento.

Tabela 12: Avaliação do índice de absorção

	<b>R1min (MΩ)</b>	<b>R30seg (MΩ)</b>	<b>Ia</b>	<b>Condição</b>
<b>AT/BT</b>	373379,9	198040,7	1,885	Excelente
<b>AT/MASSA</b>	161300,1	131429,7	1,227	Bom
<b>BT/MASSA</b>	253002,2	149650,7	1,691	Excelente

**Fonte:** Elaboração Própria, 2025.

A discrepância dos valores do índice de absorção e o de polarização pode indicar que existem caminhos condutivos no isolamento, que pode ser provocado por umidade, presença de partículas contaminantes ou a degradação do isolamento. Nesse caso, é indicado realizar a investigação do transformador de forma mais detalhada para decidir qual ação corretiva deve ser efetuada, que varia de limpeza até a substituição dos isoladores.

A avaliação do isolamento do transformador depende não apenas desses dados, mas também é indicado a realização de outros ensaios para o diagnóstico, como a análise do óleo isolante e a medição do fator de potência/tangente delta. Outro ponto interessante para considerar no diagnóstico é a idade do transformador.

## **6 CONCLUSÃO**

Os transformadores são equipamentos essenciais para a transferência de energia por longos percursos, elevando ou abaixando a tensão para reduzir os custos, portanto, é importante a manutenção constante desses equipamentos.

Por serem equipamentos complexos, com diversas variantes, existem uma grande variedade de ensaios que podem ser realizados. Assim, as Normas Regulamentadoras Brasileiras estabelecem padrões para garantir a segurança e confiabilidade do sistema.

Existem diversos ensaios de rotina que devem ser efetuados nas manutenções, entretanto no trabalho é abordado sobre ensaios de resistência de isolamento, relação de transformação e resistência dos enrolamentos. Os ensaios informados oferecem uma vasta variação de dados para obtenção de uma previsão do possível problema no transformador.

Os erros acima do permitido por norma nos ensaios de relação de transformação do dia 18/04/22 e 13/02/23 indicaram que a relação entre o número de espiras de alta e baixa tensão estão fora do esperado para o transformador, o que pode ter sido ocasionado por problemas de conexão ou por um curto-circuito, afetando o número efetivo de espiras.

Durante a manutenção do dia 07/11/23, os valores de relação de transformação apresentaram dentro do permitido por norma, indicando um falso positivo para o transformador. Apesar dos valores apresentados no TTR, a resistência de isolamento no lado de baixa tensão apresentou um valor acima do esperado, por esse problema estar evidente no ensaio X1-X2 e X1-X3, existe fortes indícios que o problema envolve a fase X1 do transformador.

Apesar dos valores do TTR estarem acima do limite estabelecido por norma nas medições anteriores (valor de 0,5%), o que significava estado de alerta, a alteração drástica da resistência ôhmica, acompanhado da normalização do resultado de relação de transformação do dia 07/11/23, reforça a hipótese da evolução progressiva do problema na bobina de baixa tensão X1. Possivelmente, o problema está relacionado à conexão da bobina X1 ou à existência de um curto-circuito que está afetando a relação de transformação.

Outro tipo de ensaio realizado em transformadores é o ensaio de resistência de isolamento, utilizando o método SDPN para a avaliação do transformador. Os resultados da

resistência de isolamento apresentaram uma tendência ao aumento de 30 segundos a 1 minuto, conforme esperado, indicando uma boa absorção dielétrica do material isolante. Ao se aproximar de 10 minutos, os valores tendem a se estabilizar, conforme esperado devido a saturação do material isolante.

Foram abordados também sobre os dois índices que avaliam a deterioração dos equipamentos: índice de absorção e índice de polarização. Os resultados apresentados no transformador ensaiado são considerados satisfatórios, porém, devido ao índice de polarização não alcançar os valores base, recomenda-se a realização de ensaios complementares para diagnóstico mais aprofundado. Os valores baixos indicam a presença de umidade ou deterioração no isolamento do transformador. Para o diagnóstico mais preciso, é crucial análise de óleo isolante (teor de umidade, rigidez dielétrica, acidez, gases dissolvidos) e medição de fator de potência/tangente delta, além disso, é necessária a comparação com os dados históricos do equipamento.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Pesquisa de dispositivos que possibilite a análise dos dados durante o período de operação do equipamento em transformadores de menores potências, viabilizando o monitoramento em tempo real;
- Realizar uma avaliação detalhada dos transformadores abordando todos os ensaios de rotina solicitados pela NBR5356, indicando os principais problemas que podem ser detectados pelo ensaio, causa e solução para o problema;
- Estudo de caso com outros equipamentos de ensaio realizados em campo, como exemplo o ensaio de relação de transformação com o analisador de energia na bobina de baixa tensão do transformador.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de potência Parte 1: Generalidades. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7036**: Recebimento, armazenagem, instalação e manutenção de transformadores de distribuição até a classe de tensão de 36,2 kV, imersos em líquido isolante. [S. l.]: ABNT, 2022. 21 p.

AZEVEDO, Filipe Miguel Tavares de. Defeitos em transformadores de potência. **Eutro À Terra**, Porto, v. 1, n. 31, p. 5-11, jan. 2023.

ARAUJO, Daniel Carrijo Polonio. **Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência**. 2009. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

BISPO, Romário Pereira. **Importância dos ensaios elétricos nos transformadores de potência**. 2019. 98 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

CARRIÃO, Fábio Henrique Dér. Transformadores: equipamentos para ensaios em campo. **O Setor Elétrico**. [S. l.], [2024?]. Disponível em: [https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Fasciculo\\_Equipamentos\\_para\\_ensaios\\_em\\_campo.pdf](https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Fasciculo_Equipamentos_para_ensaios_em_campo.pdf). Acesso em: 21 abr. 2024.

DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. **Introdução aos circuitos elétricos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2012. 800 p.

FERREIRA JUNIOR, Ailson Tavares. **Estudo prático sobre transformadores**. 2016. 60 f. TCC (Graduação em Física) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2016.

GERAÇÃO, transmissão e distribuição de energia elétrica. Aniel Dias. [S. l.]: Youtube, 2020. P&B.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.152-2013**: IEEE guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors. New York: IEEE, 2013.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

MARQUES, André Pereira. **Diagnóstico otimizado de transformadores de potência mediante a integração de técnicas preditivas**. 2018. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. São Paulo: Globo S.A., 1969.

MEGABRAS (São Paulo). **MPH253**: microhmímetro digital portátil. Microhmímetro digital portátil. [2023]. Disponível em: <https://www.megabras.com/pt-br/produtos/microhmimetro/microhmimetro-MPK253.php?gclid=Cj0KCQjwy4KqBhD>.

Acesso em: 18 abr. 2024.

MONTICELLI, Alcir. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

NOVAIS, Isabela França. **Modelagem de transformadores de potência para estudos no domínio da frequência**. 2019. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

OLIVEIRA, José Carlos de. **Transformadores: teoria e ensaios**. Itajubá: Edgard Blucher, 1984.

PAULINO, Marcelo. Polaridade e relação em transformadores de potência. **O Setor Elétrico**, [S. l.], v. 100, n. 5, p. 68-73, jun. 2014. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-v-polaridade-e-relacao-em-transformadores-de-potencia/>. Acesso em: 21 abr. 2024.

PAULINO, Marcelo Eduardo de Carvalho. Ensaio de resistência ôhmica de enrolamentos e avaliação do comutador sob carga: tipos de falhas e defeitos em transformadores de potência. **O Setor Elétrico**. [S. l.], [2014?]. Disponível em: [https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/05/ed-99\\_Fasciculo\\_Cap-IV-Manutencao-de-tr](https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/05/ed-99_Fasciculo_Cap-IV-Manutencao-de-tr). Acesso em: 21 abr. 2024.

PROTEÇÃO DOS TRANSFORMADORES – PARTE I. **O Setor Elétrico**, São Paulo, set. 2010.

RAFFO, Gustavo Viana. **Análise da corrente inrush em transformadores de potência**. 2010. 75 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

REFLEXÃO Primário e Secundário do TRANSFORMADOR. São Paulo: Maior Que Zero Fuvest, 2020. P&B.

SANTOS, Rafael Paulo dos. **Diagnóstico em transformadores de potência através de ensaios de campo**. 2012. 109 f. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2012.

SOUZA, Lucas Arruda de. **Técnicas preditivas de manutenção elétrica em transformadores de potência**. 2018. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**. Porto Alegre: Amgh, 2014.

W3 ELÉTRICA LTDA. **Ensaio de resistência de isolamento**. Fortaleza, 2024. 1 fotografia.

W3 ELÉTRICA LTDA. **Ensaio de resistência dos enrolamentos**. Fortaleza, 2024. 1 fotografia.

W3 ELÉTRICA LTDA. **Ensaio de resistência dos enrolamentos (TR225)**. Fortaleza, 2023. 1 fotografia.